

## 지반보강 효과 평가를 위한 시차 3차원 탄성과 탐사

이두성<sup>1)</sup>

### Time-lapse 3-dimensional Seismic Study to Evaluate the Effect of Ground Reinforcement

Doo Sung Lee<sup>1)</sup>

**요 약 :** 1년 시차를 두고 획득한 3차원 탄성과 자료를 분석한 결과 매질의 탄성과 속도 변화를 관찰할 수 있었다. 이 1년 기간 중에 연구지역 내에 있는 철로 지반에 대한 지반보강 공사가 실시되었다. 두 탄성과 자료중합 단면으로부터 첫 번째 반사면의 시간을 비교한 결과 연구지역의 상당 부분에서 매질의 속도가 감소된 것을 관찰할 수 있었으나 철로지반 부근에서는 속도감소를 인지할 수 없었다.

**Abstract :** Three-dimensional seismic data, recorded with an interval of one year, indicate a velocity changes in the medium at the near surface. During that period of a year, the ground reinforcement work has been conducted at the railroad base in the study area. The time-thickness to the first reflector of the two data were picked and compared. The result showed that the velocity of the medium decreased at large part of the study area; however, no velocity decrease at the railroad base.

**Keywords :** 3-D seismic, Ground reinforcement, Ground subsidence

## 서 론

강원도 도계의 채탄에 의한 지반침하 지역에서 약 1년의 시차를 두고 2회에 걸쳐 3차원 탄성과 자료를 획득한 바 있다(고광범과 이두성, 2000a, b, Koh *et al.*, 2000). 연구지역은 영동선 도계역과 고사리 지역의 중간지점으로 도계역으로부터 약 2.2 km 거리에 위치하는 철도 주변이다. 행정구역상으로는 강원도 삼척시 도계읍 마교리로 영동선 철도와 오십천 사이이다(Fig. 1). 그 기간 사이에 연구지역내의 영동선 철도의 지반에 대한 보강공사가 실시되었다. 본 논문은 지반보강 전과 후에 획득한 탄성과 영상을 비교함으로써 보강공사가 지반에 미친 영향을 평가하고자 하였다.

시차탄성과(time-lapse seismic)법은 자연 또는 인공적인 요인에 의하여 일정기간 동안에 발생한 매질의 탄성특성 변화를 고찰하기 위한 수단으로 석유업계에서 사용되어온 방법이다. 예를들면 원유증진회수법(EOR; enhanced oil recovery)의 한 방법으로 저류층에 증기 또는 CO<sub>2</sub>를 주입하거나 또는 원위치 연소법(in-situ combustion; fire-flood)을 적용한다. 이때 온도 변화 또는 가스의 주입에 의한 저류압의 탄성특성 변화를 시

차 탄성과법을 적용하여 분석함으로써 원유의 이동 상태를 고찰한다(Greeves and Fulp, 1987, Justice *et al.*, 1989). 또 다른 예로 저류층 생산관리 및 체계적인 개발계획 수립을 목적으로 시차를 두고 고분해능 3차원 탄성과탐사를 실시한다. 이때 획득한 자료로부터 도출된 저류층의 3차원 탄성과 영상을 분석하여 지하 3차원 공간상에서 원유의 저류상태의 변화를 관찰한다.

시차탄성과 자료로부터 대응하는 반사면까지의 시간과 반사 신호(reflection event)의 진폭(amplitude)을 비교함으로써 매질의 탄성특성, 즉 전파속도와 밀도의 변화를 분석할 수 있다. 3차원 탄성과자료로부터 도출한 3차원 탄성과 영상에서 관찰되는 반사면은 특성이 다른 매질의 경계면으로 추정된다. 따라서 이 영상에서 지표로부터 각 반사면까지의 탄성과 주행 시간을 측정할 수 있으며 이로부터 매질의 속도분포를 파악할 수 있다. 본 논문에서는 지표에서 가장 가까운 반사면 즉 제1 반사면의 시간을 피킹하고 이 시간들로 구성되는 제1 반사면을 3차원적으로 생성하였다. 두 탐사 자료로부터 생성된 제1 반사면의 시간두께(time-thickness)를 비교함으로써 이 구간 매질의 속도변화를 분석할 수 있다.

\*2002년 3월 14일 접수

1) 한성대학교 정보공학부(Information System Engineering, Hansung University)  
본 연구는 한성대학교 2002년 교내연구비에 의하여 수행되었다.

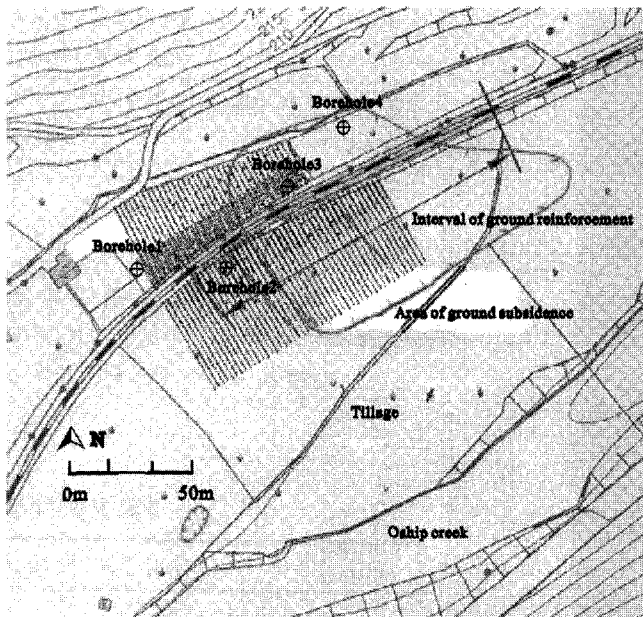


Fig. 1. Survey area is shown by a rectangular of approximately  $95 \times 87$  m, and the zones of ground subsidence are depicted by closed curves with tic-marks.

석탄합리화사업단(1996)에 의하면 이 지역은 조선 누층군의 대석회암동을 기저로 평안누층군의 만항층, 금천층, 장성층 및 함백산층, 도사곡층의 순으로 구성되어 있으며 수개 조의 단층 및 습곡구조들이 발달한다. 일반적인 주향은  $N30^{\circ}-40^{\circ}E$ 이며 경사는 습곡의 영향으로 NW 방향과 SE 방향으로 나타난다. 대상지역에는 금풍갱 및 남풍갱이 있으며 중부향사 동익부 저경사 탄층(평균탄폭 2.0~3.0 m)을 심도 25 m에서 65 m로 연층으로 개발하였다. 시추조사 결과 암회색의 중·조립질 사암이 우세하며 박층의 세일층이 협재하고, 회색내지 암회색 사암으로 구성된 연암층이 빈번하게 나타나고 전구간에 걸쳐 파쇄대가 발달하고 있다. 채굴공동은 25~55 m 사이에 존재하는 것이 확인되었다(석탄합리화사업단, 1999b). 시추공영상처리 시스템(BIPS; Borehole Image Processing System) 탐사결과 채굴공동 함몰로 인한 암반의 이완현상이 지표하부 9 m~22 m 심도에서 관측되며 공동함몰에 의한 상부지반의 10 m 이상의 폭을 가지는 공동은 추가 1호공에서 대략 33 m에서 65 m 사이에, 추가 2호공에서 16 m에서 53.6 m 사이에 걸쳐 있음을 확인하였다(석탄합리화사업단, 1999a).

### 3차원 탄성과 자료

3차원 탄성과 자료획득은 2000년 3월과 2001년 5월 두 차례에 걸쳐 수행되었으며 그 사이에 영동선 보강공사가 2000년 11월경 마무리되었다. 자료획득은 48채널 Oyo-Geospace사의 DAS-1 system과 40 Hz의 지오폰을 이용하였다. 자료획득은 4개의 3차원 템플릿으로 구성되며, CMP bin의 크기는 인라인,

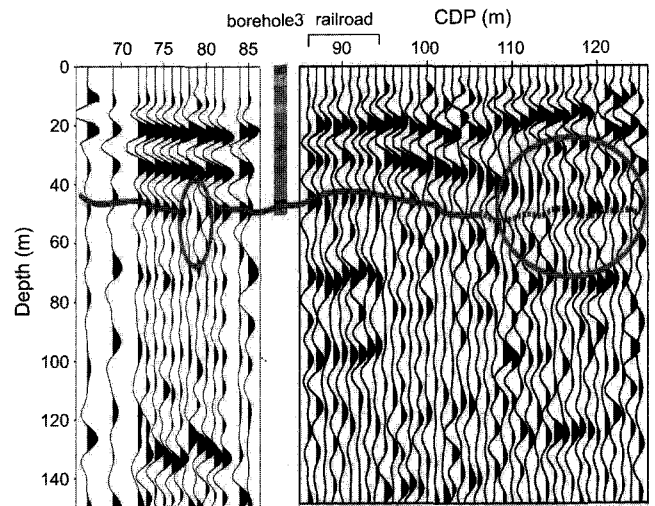


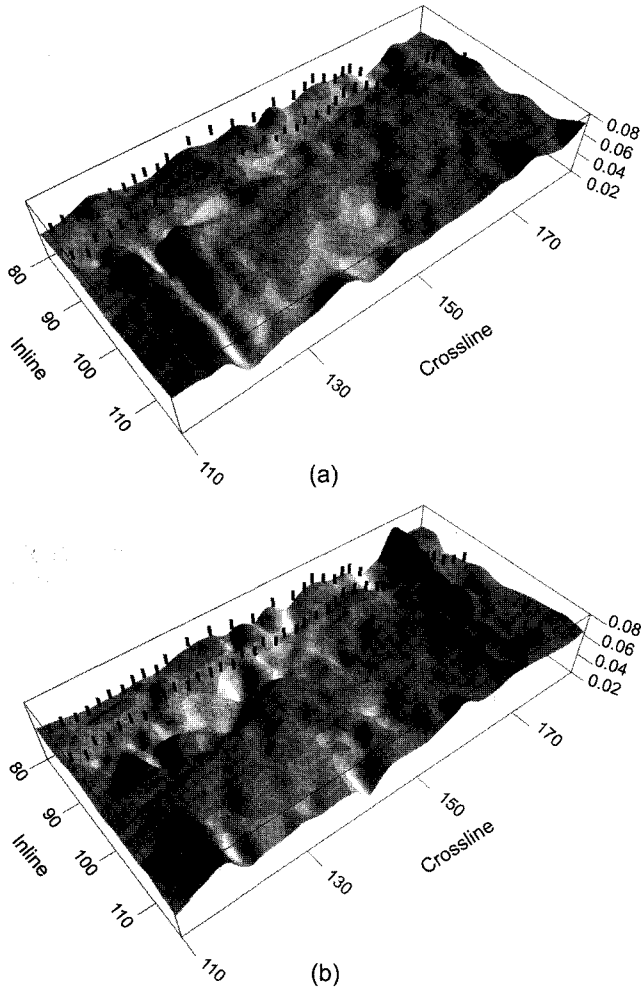
Fig. 2. Seismic stack section along the source line passing the borehole 3.

크로스라인  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 이고 nominal 중합수를 40 이상이 되도록 설계하였다(고광범 등, 2000).

보강공사 전, 후에 수행한 3차원 자료처리는 각각 동일한 기법을 사용하였다. Fig. 2는 조사지역의 시추공 3에 근접한 크로스라인 축선으로 우측이 오십천 방향이며 3개의 반사 이벤트를 인지할 수 있다. 시추자료와 비교해 보면 세 번째 반사면은 탄층을 가리키며 상부 2개의 반사 이벤트는 사암과 세일의 경계면으로 사료된다. 특히 주목할 점은 오십천 방향으로 갈수록 탄층 및 제 2 반사면의 연속성이 현저히 저하된다(Fig. 2의 우측에 타원으로 표시된 부분). 탄성반응은 이 지역의 탄층이 대부분 채굴되었음을 지시하는 것일 가능성이 있다. 실제로 남풍갱 지역은 탄층 노두가 조사지역 북동쪽 오십천 근방에 존재하였으며, 60년대에는 노두채굴이 성행하였고 이의 영향으로 노천채굴이 이루어진 지역 부근에 sinkhole형 침하가 일어나 복토를 한 사실이 있으며 이 축선은 복토작업을 한 지역에 인접한 남쪽 축선이다. 관측할 수 있는 탄성과 반사 이벤트들은 오십천 방향의 축선으로 나아감에 따라 연속성이 점차 약화됨으로 미루어 지반침하가 오십천 부근에서 심하게 진행되었음을 보여주고 있으며, 이는 지표에서 확인할 수 있는 전반적인 침하 양상과 동일하다.

### 제1 층의 속도변화

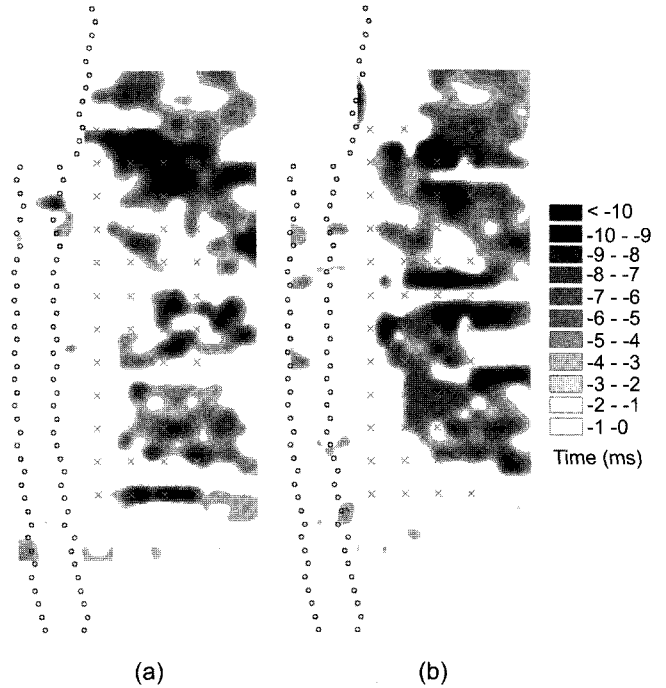
지반 보강공사 전후의 탄성과 3-D volume으로부터 각 반사면까지의 탄성과 주행 시간을 측정할 수 있으며 이로부터 매질의 속도분포를 파악할 수 있다. 본 논문에서는 제1 반사면의 시간(46~70 ms)을 피킹하고 이 시간들로 구성되는 첫 번째 반사면을 ArcView를 사용하여 3차원적으로 생성하였다(김현규와 이두성, 2001). 이 반사면까지 깊이는 10~20 m 정도이며 두 탐사 자료로부터 생성된 제1 반사면의 시간깊이를 비교할



**Fig. 3.** Time surfaces of the first reflector are shown in 3-dimensional view; (a) before and (b) after the ground reinforcement. The zone of railroad base is depicted by tic-marks.

으로써 첫 번째 지층을 구성하는 매질의 속도변화를 분석할 수 있다. 지반 보강공사 이전에 획득한 자료의 반사면과 보강공사 후의 반사면을 각각 Fig. 3a와 Fig. 3b에 제시하였다. 이 그림에서 철로지반을 막대형 심볼로 표시하였다. 여기서 흰색 부분이 시간깊이가 낮은 부분이고 검은색 부분이 깊은 부분이다.

이 두 반사면의 변화를 정량화하기 위하여 Fig. 3a를 구성하는 각 점의 시간에서 이에 대응하는 Fig. 3b의 시간을 뺐다. 이 결과를 Fig. 4a에 제시하였다. 즉 변화가 양 (+)인 경우는 매질의 전파 속도가 빨라진 경우고 음 (-)인 경우는 매질의 탄성과 전파속도가 감소된 경우이다. 여기서 시간차는 0~10 ms 정도이며, 흰색 부분이 변화가 없는 부분이고 검은색 부분이 속도감소가 크게 발생한 부분이다. Fig. 4a에서 보면 그림의 좌측, 즉 철도 부근은 속도의 감소를 확인할 수 있는 부분이 극히 적은 데 비하여 그 이외의 지역에서는 상당부분 속도가 감



**Fig. 4.** Travel time difference between the first and the second survey. (a) Time difference was generated by subtracting the time in Fig. 3b from Fig. 3a. (b) The change in time to the first reflector was estimated by cross-correlation between the two survey data. The small circles indicate zone of railroad base and the symbol 'x' indicates the receiver location of the acquisition template.

소되었음을 확인할 수 있다. Fig. 4b는 시간변화를 통계적으로 평가하기 위하여 보강 공사 이전과 이후의 데이터 중 첫 번째 반사 이벤트 부근 데이터(대략 60 ms window)의 cross-correlation을 통하여 산출한 결과이다. 두 그림을 비교해보면 상당히 유사함을 볼 수 있으며, 따라서 철로지반 이외의 부분에서는 이 1년 기간 중에도 침하가 진행되는 것으로 해석할 수 있다.

## 결론

지반침하 방지를 위한 지반보강 공사가 지반에 미친 영향을 평가하기 위하여 약 1년의 시차를 두고 보강공사 전후 2회에 걸쳐 3차원 탄성과 자료를 획득하였고, 그 자료를 분석한 결과 매질의 탄성과 속도 변화를 관찰할 수 있었다. 이 1년 기간 중에 연구지역 내에 있는 철로 지반에 대한 지반보강 공사가 실시되었다.

두 개의 탄성과 3-D volume으로부터 제일 반사면의 시간을 비교한 결과 연구지역의 상당 부분에서 매질의 속도가 감소된 것을 관찰할 수 있었으나 대부분의 철로지반 부근에서는 속도감소를 인지할 수 없었다. 이 연구에서는 매질의 속도감소를 침하에 의한 암석의 이완으로 해석하였고, 결론으로 보강공

사는 이 기간 동안 암석의 이완을 방지하였으나 그 외의 지역에서는 침하가 다소 진행되었다고 분석하였다.

### 감사의 글

본 연구에 사용한 자료는 국가지정연구실사업에서 획득한 자료의 일부이다. 자료처리 및 시각화에 협조한 영상화기술연구실 고광범 박사와 김현규씨에게 감사한다.

### 참고문헌

- 고광범, 이두성, 2000a, 지반 침하 지역에서의 천부탄성과 반사법 자료의 주파수 특성: 물리탐사, **3**, p. 19-24.
- 고광범, 이두성, 2000b, 지반침하 지역에서의 천부 탄성과 탐사 자료의 획득 및 처리: 국가지정연구실사업 1차년도 연구 보고서—탄성과 영상화기술 연구개발 및 응용, 한성대학교 영상화기술연구실, p. 64-135.
- 고광범, 지준, 이두성, 2000, 천부 탄성과탐사 자료획득을 위한 3차원 축선배열 설계: 한국자원공학회지, **37**(4), p. 232-239.
- 김현규, 이두성, 2001, ArcView를 이용한 지하정보 및 시각화 시스템 구축 사례 연구: 물리탐사, **4**(4), p. 101-109.
- 석탄합리화사업단, 1996, 고사리지역 지반안정성조사.
- 석탄합리화사업단, 1999a, 고사리지역 지반보강 실시설계 보고서.
- 석탄합리화사업단, 1999b, 고사리지역 지반보강 실시설계 지반조사 보고서.
- Greeves, R. J., and Fulp, T. J., 1987, Three-dimensional seismic monitoring of enhanced oil recovery process: *Geophysics*, **52**, 1175-1187).
- Justice, J. H., Vassiliou, A. A., Singh, S., Ranganayaki, R. P., Cunnningham, P. S., Solanki, J. J., and Allen, K. P., 1989, Recent developments in geophysics for reservoir characterization: *59th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys.*, Expanded Abstracts, 549-550.
- Koh, K. B., Gwak, S. H., and Lee, D. S., 2000, A field parameter test for the design of near-surface seismic survey in an area of ground subsidence: *Geosystem Engineering*, **3**, p. 58-63.